

10. Левашов Е.А. и др. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава TiC-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, полученного методом СВС. Физика металлов и металловедение, том 95, 2003, № 6, С. 58–64.

11. Карабасов Ю.С. Новые материалы. Москва: МИСИС, 2002. 727 с.

12. Левашов Е.А. и др. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава TiC-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, полученного методом СВС. Изв. Физика металлов и металловедение, том 95, 2003, № 6. С. 58–64.

УДК 621.891

## МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИМЕНЯЕМОЕ В ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ МАШИН

*Магистрант – Веремейчик А.П., маг 18 тс, ФТС*

*Научный*

*руководитель – Сай А.С., к.т.н., доцент*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», г. Минск, Республика Беларусь*

Объектами термометрической диагностики в машиностроении являются как агрегаты – двигатели, генераторы, турбины, так и отдельные детали – валы, оси, колеса, шины, листы обшивки, несущие детали конструкции. Изменение абсолютных значений и распределения температур на поверхностях объектов диагностирования обусловлено физическими процессами, происходящими внутри этих объектов, в том числе в толще материала, из которого они изготовлены.

Такие участки пластической деформации, как пластическая зона при вершине растущей усталостной трещины, вырабатывают больше тепла, чем другие участки образца вследствие большей площади гистерезисной петли для пластической деформации. Тепло, вырабатываемое в материале, удаляется за счет кондуктивной, конвективной и радиационной теплопередач, но участок пластической деформации сохраняет повышенную температуру по сравнению с остальным материалом.

Распределение температуры, наблюдаемое при помощи тепловизора, позволяет предсказать наиболее вероятное место усталостного повреждения до появления других признаков и таким образом контролировать степень повреждения по мере его развития.

Наблюдение термограмм плоских листов металла (сталь, алюминий, латунь и др.), нагретых выше температуры окружающей среды, позволяет обнаруживать концентраторы напряжений, в том числе мелкие, невидимые невооруженным глазом трещины, (рисунок 1), посторонние включения, неоднородность покрытия металла, различного рода загрязнения (рисунок 2). Большинство подобных дефектов можно обнаружить и на массивных деталях.

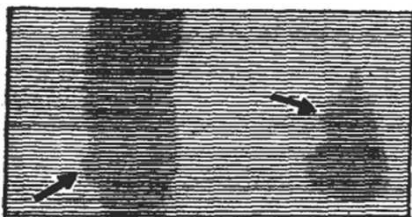


Рисунок 1 – Термограмма стального листа с концентраторами напряжений

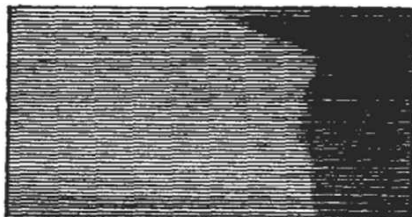


Рисунок 2 – Термограмма стального листа с неоднородной обработкой поверхности

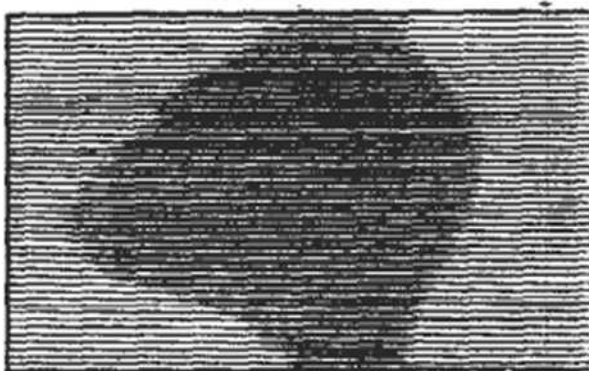


Рисунок 3 – Термограмма вращающегося образца, подверженного изгибающим нагрузкам

В настоящее время визуальные наблюдения тепловых полей – наиболее распространенная форма прогнозирования усталостных повреждений. Если такие наблюдения ведутся опытным оператором, то по данным [5] усталостные трещины можно обнаружить еще в первые 15 % срока службы детали.

Тепловые поля материалов, находящихся под воздействием циклических нагрузок, содержат информацию, позволяющую предсказать вероятное размещение усталостных повреждений задолго до того, как они проявляются в виде трещин. Регистрирующий температурные поля тепловизор позволяет также контролировать распространение трещин и определять места концентрации напряжений в циклически нагруженных материалах. Так, валы, которые подвергаются изгибающим и скручивающим нагрузкам, претерпевают наибольшие структурные изменения усталостного характера в месте будущей поломки и в этой зоне происходит повышенное выделение тепла, причем температура, как показали исследования [2, 3, 4, 5, 7], может превышать температуру соседних участков на десятки

градусов, а обнаружить такую зону можно задолго до появления видимых повреждений. Характерный вид имеет термограмма такой зоны, полученная авторами при помощи тепловизора «Янтарь» (рисунк 3).

Таким образом, непрерывная запись температуры может использоваться для выявления предстоящего разрушения.

Изучение процесса деформирования материала, приводящего в итоге к его разрушению, для различных условий нагружения (статического и циклического) связано с разработкой соответствующих энергетических критериев, основанных на балансе между затраченной, выделившейся и поглощенной материалом энергией:

$$A = E + Q. \quad (1)$$

Величина энергии  $E$ , поглощенной материалом в процессе деформирования, определяется как разность входящих в уравнение (1) величин затраченной механической  $A$  и выделившейся тепловой энергии  $C$ .

С термодинамической точки зрения в процессе циклического деформирования моменту образования трещин критического размера и разрушения материала предшествует постоянное накопление в деформируемых объемах внутренней энергии [4]. Разрушение наступает в тот момент, когда в объемах материала, ответственных за разрушение, накапливается внутренняя энергия критической величины, являющаяся константой для данного материала, не зависящей от уровня напряжений в нем [3].

Энергетические критерии для оценки состояния материалов и элементов конструкций разрабатываются на основании характеристик, полученных при статическом и циклическом нагружениях по определенной методике [2, 4, 6, 8].

Существуют экспериментальные и теоретические методы определения энергии, требующейся для возникновения усталостного повреждения при записи температуры образца во время циклического режима [3, 7, 8]. Внутренняя энергия может рассматриваться как гистерезис циклического напряжения. Общая энергия гистерезиса, накапливаемая вплоть до усталостного повреждения, равна удельной работе, ассоциируемой со статическим удлинением при разрыве в испытании на растяжение [7].

Большинство затрат энергии при гистерезисной деформации во время усталостного нагружения превращается в тепловую энергию и рассеивается через поверхность образца, и лишь небольшая часть может расходоваться на внутренние структурные изменения в материале. Было доказано [7], что энергия, накапливающаяся в образце, может не приниматься во внимание по сравнению с теплом, рассеиваемым через поверхность. Таким образом, затраты энергии, вызывающие усталостное разрушение, могут считаться равными теплу, которое конвектируется через поверхность образца во время усталостного циклического режима, приведшего к разрушению.

Бесконтактные устройства измерения температур состоят: из оптической системы, воспринимающей излучения объекта; детектора, превращающего энергию излучения в энергию электрического сигнала; электронного тракта, усиливающего и преобразующего электрические сигналы и индикаторов (рисунок 4).

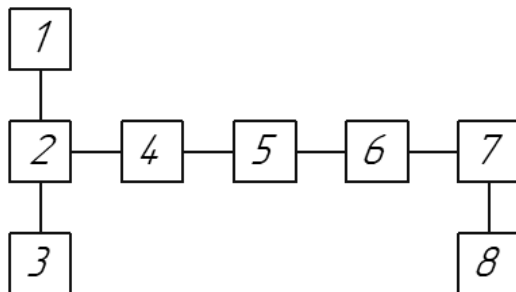


Рисунок 4 – Блок-устройства для бесконтактного измерения температур:  
 1 – система сканирования; 2 – оптическая система; 3 – обтюратор; 4 – фильтры;  
 5 – преобразователь излучения; 6 – усилительно-преобразовательный тракт;  
 7 – согласующее устройство; 8 – индикатор

Классификация устройств бесконтактного измерения температуры показана на рисунке 5. Эти устройства можно разделить на две группы: 1) устройства для измерения температур в элементе разрешения; 2) устройства для контроля тепловых полей.

Устройства измерения температур в элементе разрешения. К ним относятся пирометры без устройств сканирования. Пирометры можно классифицировать по области их спектральной чувствительности, методу измерения излучения и конструкции.

Область спектральной чувствительности пирометра имеет значение для корректировки его показаний при измерении температур нечерных излучателей. Величина корректировки определяется разностью между температурами действительной и измеренной условной, которая зависит от излучательной способности объектов. По областям спектральной чувствительности пирометры можно разделить на квазимонохроматические, т. е. чувствительные в узкой области спектра, частичного излучения – чувствительные в более широкой области спектра, и полного излучения – чувствительные в очень широкой области спектра (чувствительность практически не зависит от ширины этой области). Такие пирометры называются радиационными.

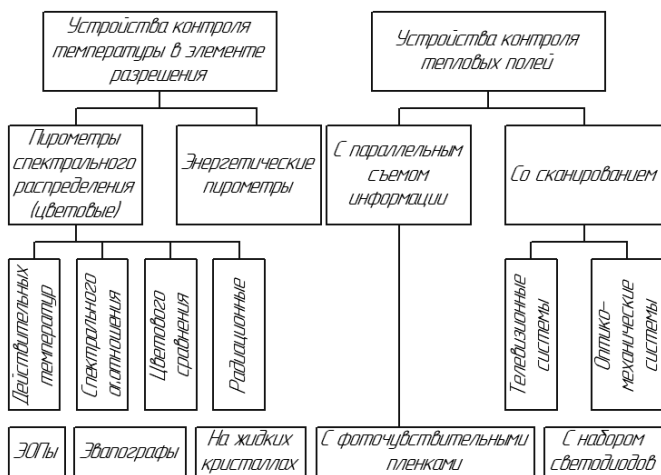


Рисунок 5 – Классификация устройств бесконтактного измерения температур

По методу измерения пирометры делят на два класса: энергетические и спектрального отношения.

Пирометры монохроматические полного и частичного излучения относятся к энергетическим пирометрам. Их действие основано на использовании зависимости потока излучения (энергетической яркости) от температуры тела.

Пирометры спектрального отношения основаны на зависимости энергетической яркости объекта от его температуры. Пирометры этого типа называются цветовыми пирометрами, так как в видимом диапазоне эти участки спектра отличаются по цвету.

Пирометры спектрального отношения делятся на два подкласса: пирометры спектрального отношения и действительных температур. При помощи пирометров спектрального отношения температуру определяют, сравнивая энергетические яркости в минимум двух различных областях спектра излучения объекта измерений. Пирометры действительных температур – устройства, реализующие такой метод измерения температуры, при котором потоки излучения от объекта в нескольких участках спектра преобразуются таким образом, что получаемая на выходе результирующая величина не зависит от температуры, а определяется только излучательной способностью объекта. Такие устройства включают в себя как собственно пирометр спектрального отношения, так и устройства для осуществления нелинейных преобразований выходных сигналов этого пирометра.

Устройства для контроля тепловых полей. Они разделяются на системы с параллельным съемом информации и сканирующие.

При параллельном съеме информации осуществляется одновременный контроль температуры в различных точках объекта. К наиболее распространенным устройствам с параллельным съемом информации относятся электронно-оптические преобразователи, эвапографы, устройства на жидких кристаллах, с фоточувствительными пленками, с набором световодов и фотоэлектрических преобразователей.

Действие эвапографа основано на зависимости толщины пленки сконденсированного пара масла от температуры подложки, на которой происходит конденсация. Основным элементом этого преобразователя – вакуумная камера, разделенная на две части тонкой (около 0,1 мкм) мембраной из нитроцеллюлозы. На одну из ее сторон, покрытую поглощающим ИК-излучение слоем, при помощи оптической системы направляется ИК-излучение от наблюдаемого предмета. Другая сторона мембраны через противоположное окно камеры освещается параллельным пучком белого света, создаваемого лампой осветителя и направляемого к мембране посредством полупрозрачного зеркала. В этой части камеры помещается небольшое количество масла. Инфракрасное излучение, поглощенное мембраной, изменяет ее температуру. Это вызывает конденсацию масла, в результате чего на поверхности мембраны образуется рельеф, соответствующий температурному полю объекта. Освещенная белым светом мембрана рассматривается наблюдателем или фотографируется.

Жидкие кристаллы холестерических соединений, наносимые непосредственно на контролируемый объект, обеспечивают прямую визуализацию теплового поля. Применение жидких кристаллов дает пространственное разрешение в 12 мкм и точность определения температуры до  $\pm 0,5$  К, однако они имеют ограниченный температурный диапазон (от 300 до 378 К).

Сканирующие системы образуют две большие группы: телевизионные и оптико-механические.

В телевизионных системах используются передающие телевизионные трубки с накоплением (суперортиконы, видиконы и др.) и без накопления (диссекторы), а также твердотельные передающие устройства. Для телевизионных систем с накоплением и без него разработаны высокоточные схемы измерения яркостных и цветовых температур, которые могут применяться для контроля быстропотекающих высокотемпературных (при плавке, прокате и т. д.) процессов. Малые габариты, высокая надежность и экономичность таких устройств обуславливает их широкое применение для контроля высоко- и низкотемпературных полей.

Охлаждаемые телевизионные трубки имеют порог детектирования от  $6 \cdot 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> для низкотемпературных объектов до  $5 \cdot 10^{-8}$  Вт/см<sup>2</sup> для среднетемпературных при спектральной характеристике с максимумами в области 1,5–27 мкм и разрешающей способности мишени 300 линий на 1 мм.

Твердотельные передающие устройства разделяются на устройства с мозаичной (матричной) структурой и с монолитной полупроводниковой структурой. Для построения мозаичных структур используются фототранзисторы, фотодиоды, фоторезисторы, биполярные транзисторы металл–окисел–полупроводники (МОП). Мозаичные передающие устройства работают в широком диапазоне освещенностей от  $10^{-3}$  до  $10^3$  лк и имеют размер фоточувствительной площадки  $10 \times 10$  мм.

Наиболее распространенными являются оптико-механические сканирующие пирометры. Для развертки изображения поля относительно преобразователя излучений в них применяются оптико-механические сканирующие системы. В большинстве сканирующих пирометрических систем производят модуляцию сигнала при помощи вращающегося прерывателя лучистого потока. Применение прерывателей позволяет повысить отношение сигнал/шум на выходе системы.

Если прерывать поток излучения с высокой частотой таким образом, чтобы на детектор излучение попадало попеременно от объекта и прерывателя, полезный сигнал окажется промодулированным с частотой, обусловленной конструкцией модулятора. Это позволяет выбрать несущую и боковые полосы частот такими, чтобы они соответствовали оптимальной полосе частот детектора и соединенного с ним усилителя. Частотная характеристика напряжения шумов в полупроводниковых детекторах имеет вид  $\sqrt{U_m^2} = kf^{1/n}$ , где  $n = 1...3$ . Поэтому собственный шум на частотах ниже 100 Гц оказывается недопустимо большим. Выбирая частоту прерывателя (модуляции) выше этой границы, полезный сигнал переносят в область частот, обеспечивающую оптимальный коэффициент передачи и другие характеристики системы. Таким образом, достигается высокая радиационная чувствительность пирометра.

С помощью отражения излучения от стандартного источника лопастями прерывателя можно производить непрерывную калибровку сигнала. Температурный дрейф у внутренних элементов пирометра не оказывает существенного влияния на точность измерений.

Сканирование сходящимся пучком при помощи зеркального барабана или диска Нипкова обеспечивает высокие видеочастотные характеристики сигналов и исключает необходимость применения прерывателей с лопастями.

Траектории сканирования пирометров определяются конкретными задачами контроля тех или иных объектов (например, строчная, крестообразная, розеточная и другие траектории). Если тепловое изображение объекта визуализируется на некотором индикаторе, то такой сканирующий пирометр называется тепловизором. Тепловизоры применяются преимущественно для контроля низкотемпературных объектов. Для получения высокой чувствительности при контроле низких температур служат исключительно охлаждаемые фотопреобразователи. Для контроля высоких температур, как правило, – неохлаждаемые.

Вывод. В термометрические диагностики машин наибольшее распространение получил метод бесконтактного контроля температурных полей деталей. Позволяющий зафиксировать температуру детали в составе агрегата и узла. Приведенная классификация устройств бесконтактного измерения температур, позволяет выбрать оптимальный прибор для проведения диагностирования определённого узла в зависимости от его условий эксплуатации, диапазона рабочих температур и доступности к узлу.

#### **Список использованных источников**

1. Канарчук В.Е., Деркачев О.Б., Чигринец А.Д. Термическая диагностика машин. - К.: Высшая шк. Головное изд-во, 1985. – 168 с.
2. Гаденин М.М., Романов А.Н. Методы экспериментального определения энергии статического и циклического упруго-пластического деформирования и разрушения. – Заводская лаб., 1978, № 8.
3. Гуревич С.Е., Гаевой А.П. Методика экспериментального определения разрывающей энергии при циклическом нагружении. – Заводская лаб., 1973. № 9.
4. Ромашев Р.В., Федоров В.В., Методика экспериментальной проверки термодинамических представлений о разрушении твердого тела в процессе усталостных испытаний. – Заводская лаб., 1975, № 2.
5. Charles J. A., Appl F. J., Francis J. E. Using the Scanning Infrared camera may be used to predict the location of impending fatigue cracks, and map temperature fields around stress concentrations. Experimental Mechanics, Rostok, April, 1976.
6. Higuchi M., Imai Y., Takenaka M. Heat Generation with Rotating Bending Fatigue of a steel and Deduction of the Fatigue Notch Factor. Bulletin of the JSME, Vol. 17, N 113, November, 1974.
7. Kothandaraman C. P. Measurement of Energy Required to Cause Fatigue Failure Through a Record of Specimen Temperature During Cycling. Journal MF, India. Vol 59, 1979.
8. Whitecomb J. D. Thermographic Measurement of Fatigue Damage. In the book Composite materials: Testing and Design. ASTM stp 674, s. w. Tsai, Ed. American Society for testing materials, 1979.

УДК 339.18 (476)

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ЗАПАСАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Студентка – Рябченко М.А., 4 мот, 4 курс, ФТС  
Научные*

*руководители – Василевский П.Н., ст. преподаватель;  
Драгун С.Н., ассистент*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», г. Минск, Республика Беларусь*

Одним из важных факторов повышения эффективности сельскохозяйственной деятельности является рациональное управление